تعیین ضرایب هم‌سنگ سواری برای موتورسیکلت، اتوبوس و مینی‌بوس در تقاطع‌های چراغ‌دار شهری ایران، مطالعهٔ موردی در شهرهای اصفهان و یزد*

مریم دهقانی‌زاده[۱] مهدی فلاح تفتی[۲]

چکیده درحال حاضر در مطالعات و طراحی‌های مربوط به تقاطعات چراغ‌دار ایران، از مقادیر ضریب هم سنگ سواری پیشنهادی توسط سایر آیین‌نامه‌های معتبر دنیا استفاده می شود که به‌نظر می‌رسد باتوجه به خصوصیات متفاوت هندسی، رفتاری و خودروها در کشورمان با کشورهای دیگر، تأثیر منفی بر درستی تحلیل‌های ظرفیتی آنها داشته باشد؛ لذا در این مطالعه سعی شد تا برای نخستین بار بااستفاده از روش آنالیز رگرسیون چندمتغیره، مقادیر ضرایب هم‌سنگ سواری برای اتوبوس، مینی‌بوس و موتورسیکلت‌های عبوری در تقاطعات چراغ‌دار شهری محاسبه شود. این مطالعه در محدودهٔ ۹ تقاطع چراغ‌دار شهرهای اصفهان و یزد انجام شد و روابط پیشنهادی در نرم‌افزار SPSS برازش شدند؛ سپس از ضرایب پرداخت شده برای مدل استفاده شد و مقادیر ۰/٤٦، ۱/٤٥ و ۲/۵۳ به‌ترتیب برای ضرایب معادل سواری موتور سیکلت، مینی‌بوس و اتوبوس به‌دست آمد؛ هم‌چنین ضریب هم‌سنگ سواری کلی برای وسایل نقلیهٔ سنگین برابر ۲/۱۳ به‌دست آمد. از این نتایج می‌توان به‌عنوان بهترین تخمین موجود برای تعیین ضریب هم‌سنگ در دیگر تقاطع‌های چراغ‌دار مشابه در کشور استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی ضریب هم‌سنگ سواری، تقاطع‌های چراغ‌دار، آنالیز رگرسیون چندمتغیره، ظرفیت تقاطع.

Determination of Equivalent Passenger Car Unit for Motorcycles, Buses and Minibuses at Urban Signalized Intersections in Iran, Case Study: Isfahan and Yazd City

M. Dehghanizadeh M. Fallah Tafti

Abstract *At present, the Equivalent Passenger Car Unit (PCU) values, proposed by other international guides, are used in the design and analysis of signalized intersections in Iran. It is likely that this would produce a negative impact of the accuracy of capacity analysis used for these intersections as the geometric design, behavioral attributes and vehicle characteristics are different here. Hence, it was decided to estimate the PCU values for buses, minibuses and motorcycles at Iranian signalized intersections using a multiple linear regression in this study. The required field data was collected from 9 intersections located at Isfahan and Yazd cities and the regression analysis was then performed on the data using SPSS software. Thereby, the PCU values for the motorcycles, minibuses and buses were obtained as 0.46, 1.45 and 2.53. Finally, an overall average PCU value of 2.13 was obtained for the heavy vehicles. The results could be used as the best estimate of PCU values for the similar Iranian signalized intersections.*

Key Word Passenger Car Unit**,** Signalized Intersections, Multiple Linear Regression**,** Intersection Capacity.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۳/۱۰و تاریخ پذیرش آن۱٤۰۰/۷/٦ از صفحه ۱ تا ۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

Email: Fallah.Tafti@yazd.ac.ir

مقدمه

هم‌سنگ سواری هر وسیلهٔ نقلیه عبارت است از تعداد خودروی سواری معادل که در جریان ترافیک جایگزین آن وسیلهٔ نقلیه می‌شود بدون آن‌که تغییری در شرایط جاده و یا جریان ترافیک به‌وجود آید. تفاوت در ویژگی‌ها و عملکرد وسایل نقلیهٔ سنگین و موتورسیکلت‌ها با وسایل نقلیهٔ سواری باعث ایجاد تغییرات زیادی در خصوصیات جریان ترافیک می‌شود. یکی از عمده‌ترین روش‌ها برای ایجاد وحدت رویه در تحلیل جریان‌های ترافیکی، تبدیل تمامی انواع وسایل نقلیهٔ موجود در یک بخش از شبکهٔ جاده‌ای به یک نوع وسیلهٔ نقلیهٔ معادل می‌باشد. این مفهوم برای اولین‌بار در آیین‌نامهٔ ظرفیت راه‌های آمریکا در سال ۱۹٦۵ برای برآورد میزان تأثیر وسایل نقلیهٔ سنگین از قبیل اتوبوس و کامیون در جریان ترافیک معرفی شد [1]. به‌دنبال آن، روش‌های متنوع دیگری نیز پیشنهاد شده‌اند که در بخش پیشینهٔ پژوهش به آنها اشاره شده‌است.

علی‌رغم شرایط ترافیکی ناهمگن و بی‌نظم حاکم بر تقاطع‌ها در کشور ایران، در مطالعات ترافیکی این تقاطع‌ها عمدتا از ضرایب هم‌سنگ سواری پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های کشورهای دیگر استفاده می‌شود. چرا که تاکنون این ضرایب برای شرایط ترافیکی کشور ایران در یک مطالعهٔ نسبتا گسترده اندازه‌گیری نشده‌اند. در این مقاله، نتایج یک پژوهش انجام‌شده برای اندازه‌گیری ضرایب هم‌سنگ سواری در تعدادی از تقاطع‌های چراغ‌دار واقع در دو شهر اصفهان و یزد، به‌عنوان نمادی از دو شهر به‌ترتیب کلان‌شهر و متوسط ایران، ارائه شده‌است. باتوجه به کارایی بالای روش آنالیز رگرسیون به‌عنوان یک روش مناسب برای تعیین ضریب هم‌سنگ سواری در تقاطعات چراغ‌دار با شرایط هندسی و ترافیکی نامنظم، در این پژوهش از این روش استفاده شده‌است. هدف اصلی این پژوهش تخمین ضرایب هم‌سنگ سواری مناسب به‌منظور استفاده در طراحی تحلیل ظرفیت از طریق محاسبهٔ نرخ تردد اشباع و تعیین سطح سرویس در تقاطعات چراغ‌دار بود. فلاح و دهقانی‌زاده [2] در مطالعه‌ای، برای مقایسه و مدل‌سازی نرخ جریان اشباع تقاطعات چراغ‌دار از ضرایب هم‌سنگ سواری به‌روش رگرسیون نیز استفاده کردند.

پیشینهٔ تحقیق

از گذشته تاکنون مطالعات متعددی درزمینهٔ محاسبهٔ ضرایب هم‌سنگ سواری انجام شده‌است؛ ازجمله مطالعات صورت‌گرفته در این خصوص، روش محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری برمبنای سرفاصلهٔ زمانی، نسبت حجم به ظرفیت مشابه، سرعت وسایل نقلیهٔ عبوری، تأخیر وارد بر وسایل نقلیه، بهینه‌سازی، نمودارهای چگالی- نرخ جریان ترافیک و آنالیز رگرسیون می‌باشد که در ادامه به نمونه‌هایی از مطالعات مرتبط با هر کدام از این روش‌ها اشاره شده‌است.

روش‌های مبتنی بر سرفاصلهٔ زمانی

در روش مبتنی بر سرفاصلهٔ زمانی، متوسط سرفاصلهٔ زمانی حرکت وسایل نقلیه در هنگام عبور از تقاطع تعیین می‌گردد [3]. برای این منظور معمولا سرفاصله‌های زمانی، نسبت‌به خط توقف ورودی تقاطع اندازه‌گیری می‌شوند و زمان عبور محور عقب وسیلهٔ نقلیه از خط توقف ثبت می‌گردد. نخستین سرفاصلهٔ زمانی، زمان بین شروع فاز سبز و عبور محور عقبی اولین وسیله از خط توقف است. سرفاصله‌های بعدی حدفاصل زمانی عبور محور عقب دو وسیلهٔ نقلیه متوالی از خط توقف خواهد بود [4, ۵]. لازم به ذکر است که این روش در قارهٔ اروپا بسیار معمول است [6].

کرامس و کرولی [1] با مقایسهٔ چندین روش موجود، مدلی برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری براساس سرفاصلهٔ عقبی کامیون‌های پشت سر سایر وسایل نقلیهٔ سواری در جریان مختلط و سرفاصلهٔ عقبی کامیون‌های پشت سر کامیون‌های دیگر ارائه دادند. این پژوهش در یک مسیر با سطح عملکردی آزادراه بررسی شد. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش نسبت کامیون‌ها، مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری افزایش خواهد یافت. ورنر و مورال مدلی براساس سرفاصلهٔ زمانی متوسط در مسیر جریان ترافیکی ارائه دادند. آنها برپایهٔ این بررسی

نتیجه گرفتند که این روش برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری در سطوح سرویس پایین مناسب‌تر خواهد بود [7].

به‌طور کلی هنگامی‌که رانندگان به‌طور پایدار، منظم و همگن حرکت کنند، مفهوم سرفاصله معنا دارد و این روش قابل استفاده خواهد بود. این روش نیازمند حجم دادهٔ میدانی نسبتا محدودی است و از طرفی در شرایط با حجم ترافیکی خیلی کم به‌علت فاصلهٔ زیاد بین وسایل نقلیهٔ عبوری، عملا این روش مفهومی ندارد. هم‌چنین با نزدیک شدن ترافیک به مقدار ظرفیت و با فرض خطی بودن رابطهٔ سرعت و حجم ترافیک، نتایج حاصل از این روش دقیق نمی‌باشد [۹ و ۸].

روش‌های مبتنی بر نسبت حجم به ظرفیت مشابه

دستورالعمل انجمن تحقیقات حمل و نقلی(TRB) آمریکا ضرایب هم‌سنگ سواری را براساس نسبت حجم به ظرفیت ثابت ارائه داده‌است. در این روش، مقادیر هم‌سنگ سواری به شکلی محاسبه شده‌است که با اعمال آن بر جریان مختلط، جریان ترافیکی معادل سواری حاصل، نسبت حجم به ظرفیت مشابهی با حالت مختلط داشته باشد. نتایج حاصل از کاربرد این روش نشان داد که با تغییر این نسبت و سرعت طرح آزادراه‌ها ضریب هم‌سنگ سواری تغییر عمده‌ای ندارد [1]. در گذشته که سطح سرویس راه‌ها به‌صورت ضریبی از حجم به ظرفیت محاسبه می‌شد، این روش قابل استفاده بود.

روش‌های مبتنی بر سرعت وسایل نقلیهٔ عبوری

سرعت وسایل نقلیه، یکی از پارامترهای اساسی برای تخمین سطح سرویس جاده‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که دو مسیر با شرایط فیزیکی و دانسیتهٔ یکسان، که یکی متشکل از جریان ترافیکی خودروهای سواری و دیگری مختلط می‌باشد، سرعت حرکت متفاوتی را خواهند داشت. چندرا و کومار برای محاسبهٔ ضرایب هم‌سنگ سواری کشور هند، یک مدل ارائه دادند. آنها مقادیر هم‌سنگ سواری دینامیکی را برای وسایل نقلیهٔ مختلف براساس نسبت سرعت و نیز نسبت فضایی که این وسایل نقلیه اشغال می‌کردند، ارائه دادند. تغییرات نسبت سرعت تابعی از شرایط مسیر و ترافیک عبوری بود و نسبت فضای اشغال‌شده، مانور هر وسیله را باتوجه به وسیلهٔ نقلیهٔ سواری نشان می‌داد [10]. هو و جانسون[11] بااستفاده از راهنمای ظرفیت راه‌های آمریکا در سال ۱۹۶۵، یک مدل براساس سرعت ارائه دادند. در این روش از مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری برای تبدیل یک جریان مختلط به یک جریان تنها شامل خودروی سواری با سرعت عملکردی یکسان استفاده شد. در این روش، قطعات طولانی آزادراهی مورد بررسی قرار گرفتند. سنت جانو گلوز [12] با بررسی عملکرد کامیون‌ها یک فاکتور غیرخطی برای این وسایل نقلیه ارائه دادند و براساس این فاکتور، بین سرعت و جریان ترافیکی ارتباط برقرار کردند.

روش مبتنی بر سرعت وسایل نقلیهٔ عبوری، برای جاده‌هایی که سطح سرویس و تحلیل ظرفیت آنها براساس سرعت محاسبه می‌گردد، مناسب می‌باشد. به‌طور کلی این روش، نیازمند داده‌های کافی از تغییرات سرعت و زمان سفر برای نرخ‌های جریان متفاوت و ترکیب ترافیک مختلف می‌باشد.

روش‌های مبتنی بر تأخیر نسبی

خاکی و ناصری‌فرد[۱۳] طی پژوهشی، ضریب هم‌سنگ سواری برای موتورسیکلت را در تقاطع‌های چراغ‌دار ارائه دادند. تحلیل آنها براساس روش تأخیر و روش آماری تجزیهٔ واریانس بود. آنها نتیجه گرفتند در سطح اطمینان ۹۵٪، ضریب هم‌سنگ سواری مربوط به موتورسیکلت‌ها در بازهٔ ۰/۴۲ تا ۰/۹ متغیر بوده و نسبت‌به تغییرات حجم ترافیک و درصد موتورسیکلت در ترکیب ترافیک، وابستگی بسیار کمی دارد. نصیری و طباطبایی براساس نسبت تأخیر ایجادشدهٔ ناشی از وسایل نقلیهٔ سنگین به تأخیر ایجادشدهٔ ناشی از خودروهای سواری، مقدار ضریب هم‌سنگ سواری را در تقاطع‌های چراغ‌دار ایران پیشنهاد دادند. آنها نتیجه گرفتند که این مقدار عدد ثابتی نیست و تابع حجم ترافیک در رویکردهای ورودی

تقاطعات می‌باشد [١٤]. کاناگین و مسر[15] نیز یک مدل برای تخمین مقادیر هم‌سنگ سواری برای راه‌های چند بانده پیشنهاد دادند. این مدل براساس تأخیرات وارد بر وسایل نقلیهٔ سبقت‌گیرنده توسط جریان خودروی سنگین موجود در جریان ترافیکی بود. در این روش، تأثیر شرایط عوارض منطقهٔ عبور راه مانند واقع بودن در دشت، تپه ماهور و یا کوهستان نیز در محاسبهٔ ضرایب موردنظر لحاظ شده‌است.

روش‌های مبتنی بر تأخیر نسبی، با در نظر گرفتن تأخیر وارد بر وسایل نقلیه در تقاطعات شهری و یا تأخیر ناشی از مانورهای سبقت در راه‌های بین شهری، به‌عنوان معیاری از سطح سرویس، ضرایب هم‌سنگ نسبتا دقیقی را ارائه می‌دهند. به‌طور کلی در شرایطی که حجم ترافیک نزدیک به ظرفیت باشد، وسایل نقلیهٔ کندتر مانند کامیون-ها مانع حرکت سایر وسایل نقلیه و منجر به تشکیل صفی از وسایل نقلیه می‌شوند. به‌نظر می‌رسد، روش مبتنی بر تأخیر نسبی برای این شرایط ترافیکی مناسب است و در شرایط ترافیکی غیراشباع، نتایج دقیقی را ارائه نخواهد داد. لازم به ذکر است که در این روش، از مفهوم نسبت تأخیرها استفاده شده که تعریف واحدی ندارد [٩ و ٨].

روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

روش‌های مبتنی بر تکنیک بهینه‌سازی نیز برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری ارائه شده‌است.در این روش ضرایب هم‌سنگ سواری به‌گونه‌ای تخمین زده می‌شوند که اختلاف بین نرخ جریان اشباع پایه و جریان مشاهده‌شده در طول زمان اشباع کمینه شود. در این روش که اولین‌بار توسط ستی و دمارچی ارائه شد، برای ساخت یک مدل مشابه، نیاز به یک مدل‌سازی جریان ترافیک می‌باشد که معمولا با برداشت میدانی قابل‌توجه، زمان و هزینهٔ زیادی همراه است. از مزایای عمدهٔ این روش می-توان به وجود بیش از یک وسیلهٔ نقلیه در جریان ترافیک و بررسی اثر متقابل وسایل نقلیه بر یکدیگر اشاره کرد [16].

روش‌های مبتنی بر نمودارهای چگالی- نرخ جریان

اویسی و همکاران[١٧] بااستفاده از نمودارهای چگالی-نرخ جریان، ضریب هم‌سنگ سواری برای وسایل نقلیهٔ سنگین در آزادراه‌های ایران را ارائه دادند. آنها برای شناسایی بهترین مدل از مدل‌سازی ریاضی استفاده کردند و در مقطع پایهٔ آزادراهی و در شیب طولی کمتر از ٢ درصد، برای ٣ الی ١٠ درصد وسایل نقلیهٔ سنگین و بیش از ١٠ درصد به‌ترتیب ضرایب هم‌سنگ سواری ٢ و ١/٧ را ارائه دادند.

روش‌های مبتنی بر تحلیل رگرسیون

منح و سانو[18]، ٤ تقاطع چراغ‌دار شهر هانوی در ویتنام و ٣ تقاطع چراغ‌دار شهر بانکوک در تایلند را برای محاسبهٔ مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری، مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این تقاطعات، حجم موتورسیکلت‌های عبوری بسیار زیاد و عبور وسایل نقلیهٔ سنگین ممنوع شده بود. آنها با روش آنالیز رگرسیون چندگانه، مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری اتوبوس و موتورسیکلت را برای شهر هانوی به‌ترتیب برابر با ٢/٢٦ و ٠/٢٤ و برای شهر بانکوک به‌ترتیب برابر با ٢/١٨ و ٠/١٨ پیشنهاد دادند.

این روش همان‌طور که اشاره شد روش بسیار مناسبی برای برآورد ضریب هم‌سنگ سواری برای تقاطعات شهری علی‌الخصوص برای حالت ناهمگن می-باشد. این در حالی است که تقریبا اکثر روش‌های فوق‌الذکر برای شرایط ترافیکی همگن مناسب می‌باشند.

مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر

کومار و همکاران [19] تحت پژوهشی، ضریب هم‌سنگ سواری را در جاده‌های چندخطهٔ شهری با شرایط ترافیکی ناهمگن بررسی کردند و در این خصوص یک روش جدید برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری ارائه دادند. در این پژوهش، از پارامتر فضای اشغال‌شدهٔ وسایل نقلیه به‌عنوان معیار عملکردی استفاده شد. برای بررسی صحت روش پیشنهادی، نتایج حاصل با مقادیر ضریب

هم‌سنگ سواری بهینه، ضرایب دینامیکی (نسبت سرعت به مساحت اشغال‌شده) و مقادیر ذکرشده در دستورالعمل‌های معتبر موجود مقایسه شد. این پژوهش نشان داد که پارامترهای میکرو، مانند فضای اشغال، هم می‌توانند به‌عنوان یک معیار عملکردی برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری محسوب گردند.

پاجکی و همکاران[20] بااستفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز ویزیم، ضریب هم‌سنگ سواری را برای چهار نوع وسیلهٔ نقلیهٔ سنگین در ورودی میادین شهری محاسبه کردند. در این پژوهش، چندین سناریو با تقاضای ترافیک متفاوت تعریف شد، مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری ستفاده از مدل رگرسیونی محاسبه شد و سپس یک رابطهٔ دینامیکی پیشنهاد شد. این رابطه شباهت‌های زیادی با رابطهٔ ارائه‌شده در دستورالعمل ظرفیت راه‌های آمریکا دارد اما با تغییر اندکی در آن، اثر انوع وسایل نقلیهٔ سنگین لحاظ شده‌است.

پال و همکاران[21] در پژوهشی، تأثیر روش‌های مختلف تخمین ضریب هم‌سنگ سواری بر ظرفیت جاده‌های دوخطهٔ جدانشدهٔ بین شهری را بررسی کردند. در این پژوهش، ضرایب هم‌سنگ سواری از سه روش تخمین زده شد. در روش اول، از ضرایب آمادهٔ کنگرهٔ راه‌های هند استفاده شد. در روش دوم، این ضرایب به‌روش دینامیکی، نسبت سرعت به فضای اشغال‌شده توسط وسایل نقلیه، محاسبه شد. در سومین روش، این ضرایب بااستفاده از دستورالعمل ظرفیت راه‌های هند تخمین زده شد. در این روش ضریب هم‌سنگ سواری انتخابی برای هر وسیلهٔ نقلیه وابسته به نسبت حجم ترافیک همان وسیلهٔ نقلیه به کل جریان مسیر می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که تخمین ظرفیت بااستفاده از ضرایب هم‌سنگ سواری در روش دوم و سوم، بسیار به شرایط واقعی نزدیک است.

موندال و همکاران[22] در پژوهشی، نرخ جریان اشباع محاسبه‌شده بااستفاده از مقادیر مختلف ضریب هم‌سنگ سواری را در شش تقاطع چراغ‌دار با شرایط ترافیکی ناهمگن مقایسه کردند. برای تخمین ضریب هم‌سنگ سواری از تکنیک بهینه‌سازی اختلاف بین نرخ جریان اشباع میدانی و ایده‌آل، تکنیک رگرسیون، روش نرخ تخلیهٔ صف ترافیک و بهینه‌سازی بااستفاده از نرمالیزه کردن جریان عبوری استفاده شد. نتایج حاصل نشان دادند که چهارمین روش نام‌برده، بهترین روش برای تخمین ضریب هم‌سنگ سواری می‌باشد. این نتیجه از مقایسهٔ مقادیر جریان اشباع حاصل از روش‌های مذکور با جریان اشباع حاصل از دستورالعمل ظرفیت راه‌های آمریکا به‌دست آمد.

گرانا و همکاران[23] در پژوهشی، ضریب هم‌سنگ سواری را برای میادین دوخطه و توربو در محیط شبیه‌ساز ایمسان به‌طور دقیق تخمین زدند. هدف از این پژوهش، به حداقل رساندن میانگین مربعات اختلاف بین ظرفیت خطوط ورودی به میدان در شبیه‌سازی و مقادیر تجربی بود.

سوگیارتو و همکاران[24] بااستفاده از رگرسیون خطی بیزین، ضریب هم‌سنگ سواری را برای تقاطعات چراغ‌دار با فازبندی از پیش تعیین شده تخمین زدند. این تقاطعات شامل درصد موتورسیکلت بالایی بود. نتایج حاصل با مقادیر ضریب هم‌سنگ دستورالعمل ظرفیت راه‌های هند انحراف زیادی داشت که علت آن ترافیک مختلط حاکم بر تقاطع بود. رابطهٔ پیشنهادی در این پژوهش برای نرخ جریان اشباع پایه در مقایسه با رابطهٔ دستورالعمل ظرفیت راه‌های هند، تطبیق بیشتری با شرایط ترافیکی مختلط و ناهمگن داشت.

مقایسهٔ روش‌های برشمرده شده در این بخش نشان می‌دهد که در روش‌های پیشنهادی تاکنون عموما سعی شده‌است که با مبنا قرار دادن یک یا دو شاخص ترافیکی، تأثیر معادل وسایل نقلیهٔ سنگین و موتورسیکلت در مقایسه با خودروهای سواری برآورد و نسبت این تأثیر به‌عنوان ضریب هم‌سنگ سواری به‌دست آید. در این میان، روش مبتنی بر تحلیل رگرسیون باتوجه به این‌که تأثیر کلی عوامل ترافیکی، هندسی، محیطی و رفتار رانندگان را توأما در نظر می‌گیرد و تجربهٔ استفاده از آن در کشورهایی با شرایط ترافیکی ناهمگن و بی‌نظم موفقیت آمیز بوده‌است، به‌عنوان روش تحلیلی مورد استفاده در این تحقیق انتخاب گردید.

روش پژوهش

ترافیک عبوری از تقاطع‌های چراغ‌دار شهری معمولا علاوه‌بر خودروهای سواری شامل موتورسیکلت و وسایل نقلیهٔ سنگین مانند کامیون و اتوبوس می‌باشد. در این پژوهش، با انتخاب تعدادی از تقاطعات چراغ‌دار شلوغ شهرهای اصفهان و یزد و بااستفاده از روش آنالیز رگرسیون چندمتغیره که توسط منح و سانو ارائه شده‌است، ضرایب هم‌سنگ سواری اتوبوس، مینی‌بوس و موتورسیکلت برای شرایط ترافیکی اشباع محاسبه شدند. در تقاطعات چراغ‌دار شهری، محاسبهٔ فازبندی چراغ راهنمایی نیازمند تخمین پارامتر نرخ جریان اشباع می‌باشد. برای محاسبهٔ نرخ جریان اشباع نیز ضریب هم‌سنگ سواری مورد نیاز است؛ به همین دلیل در این پژوهش، از زمان سبز اشباع برای تحلیل رگرسیون استفاده شده‌است.

برای این منظور، ابتدا کل زمان فاز سبز در هر سیکل به بازه‌های ۵ ثانیه‌ای تقسیم شد و تعداد وسایل نقلیهٔ سواری، موتورسیکلت، اتوبوس و مینی‌بوس به تفکیک در این بازه‌ها شمارش شدند. سپس بازه‌های زمانی ۵ ثانیه‌ای که در هر یک بیش از ۳ وسیلهٔ نقلیهٔ معادل سواری از خط ایست آن رویکرد عبور کرده بودند، به‌عنوان بازه‌های زمانی با جریان ترافیک اشباع در نظر گرفته شدند. در این مرحله، باتوجه به مشخص نبودن ضرایب معادل سواری، از مقادیر پیشنهادی برای کشور هند که در جدول (۱) ارائه شده‌است، استفاده شد [25]. سپس برای هر رویکرد ورودی تحت بررسی تقاطع، مجموع بازه‌های زمانی اشباع در هر سیکل، و تعداد انواع وسایل نقلیهٔ عبوری از رویکرد در طی این مدت به تفکیک محاسبه شدند. اطلاعات حاصل برای تعدادی سیکل چراغ در رویکرد مورد نظر در یک آنالیز رگرسیون چند متغیرهٔ خطی با معادلهٔ کلی نشان داده شده در رابطهٔ (۱) استفاده شد. سپس بااستفاده از ضرایب پرداخت‌شده برای مدل، ضرایب معادل سواری برای وسایل نقلیهٔ سنگین و موتورسیکلت از رابطهٔ (۲) محاسبه شدند.

$$t = n_1a_1 + n_2a_2 + n_3a_3 \qquad (۱)$$

$$p_i = \frac{a_i}{a_1} \qquad (۲)$$

جدول ۱ ضرایب معادل سواری پیشنهادی کنگرهٔ جادهٔ هند [25]

نوع وسیلهٔ نقلیه	ضریب معادل سواری
موتورسیکلت	۰/۵
سه‌چرخه	۰/۷
اتوبوس	۲

که در روابط فوق، n_i تعداد وسایل نقلیهٔ عبوری از گروه iام در هر سیکل، a_1، a_2 و a_3 ها به‌ترتیب ضرایب حاصل از تحلیل رگرسیون برای وسیلهٔ نقلیهٔ سواری، موتورسیکلت و وسیلهٔ نقلیهٔ سنگین، t زمان سبز اشباع کل در هر سیکل چراغ (ثانیه) و p_i ضرایب هم‌سنگ سواری برای گروه iام وسایل نقلیه می‌باشند.

برداشت اطلاعات

در این پژوهش، در مرحلهٔ نخست تعداد نمونهٔ لازم که همان تعداد سیکل‌های موردنیاز بود، بااستفاده از رابطهٔ کوکران برای جامعهٔ نامحدود محاسبه شد. این رابطه برای درصد خطای ۵٪، تعداد ۳۸۴ نمونه را پیشنهاد می‌دهد. در این روش توصیه شده که تعداد نمونه، ۱۰٪ بیش از مقادیر حاصل از رابطهٔ کوکران برداشت شود. سپس اطلاعات ترافیکی و زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی مربوط به ۸ رویکرد ورودی از تقاطع‌های چراغ‌دار شهر یزد و ۵ رویکرد ورودی از تقاطع‌های چراغ‌دار شهر اصفهان به‌صورت فیلم‌برداری برداشت شد. این داده‌ها، در زمان اوج ترافیک اشباع (۷:۳۰ الی ۸:۳۰ و ۱۹:۳۰ الی ۲۰:۳۰) در دو هفتهٔ آخر اسفندماه برداشت شد. سپس ۴۲۵ سیکل اشباع انتخاب و نرخ ورود وسایل نقلیه به تقاطع به تفکیک سواری، سنگین (شامل اتوبوس و مینی‌بوس) و موتورسیکلت در بازه‌های زمانی سبز اشباع برداشت شدند و وسایل نقلیه‌ای که قبل از شروع فاز سبز اقدام به حرکت کرده بودند حذف گردیدند.

شـــایان ذکر اســـت که باتوجه به تعداد ناچیز کامیون‌های مشاهده شده در مقایسه با سایر خودروهای سـنگین، این نوع خودروها در موارد نادر مشـاهده‌شـده به‌عنوان اتوبوس شمارش شدند. برخی از مشخصات هندسی، ترافیکی و زمان‌بندی رویکردهای موردبررسی در جدول (۲)، شـــکل های (۱) الی شـــکل (٤) ارائه شده‌است.

جدول ۲ مشخصات رویکردهای ورودی تقاطعات مورد بررسی

شهر	کد	نام رویکرد	عرض مؤثر کل (متر)	عرض مؤثر هر خط (متر)	تعداد خطوط عبوری	زمان سبز (ثانیه)	مدت زمان سیکل (ثانیه)	حمایت شده/نشده
یزد	DN	تقاطع دولت‌آباد- از سمت بلوار نواب	۱۰/۵	۳/۵	۳	۲۱	۹۸	حمایت شده
	DE	تقاطع دولت‌آباد- از سمت خیابان انقلاب	٦/۳	۳/۱۵	۲	۲۰	۹۸	حمایت شده
	IP	تقاطع ایرانشهر-از سمت بلوار پاک‌نژاد	۹/۲	۳/۰٦	۳	۲۸	٦۳	حمایت نشده
	IE	تقاطع ایرانشهر- از سمت بلوار امامزاده جعفر	۱۰	۳/۳	۳	۲۸	٦۳	حمایت نشده
	MD	تقاطع مهدی- از سمت بلوار دههٔ فجر	۸/٦	۲/۹	۳	۳۱-۲۹	۷۱-۵۹	حمایت نشده
	FP	تقاطع فرهنگیان- از سمت بلوار پاک‌نژاد	۹/۷	۳/۲	۳	۱۹	۵۱	حمایت نشده
	PA	تقاطع پژوهش- از سمت میدان عالم	۱۲	۳	٤	۱۵-۲٦	۱٤۲-۹۵	حمایت شده
	PF	تقاطع پژوهش- از سمت فلکهٔ اطلسی	۱۱	۲/۸	٤	۱۱-۳۲	۱٤۲-۹۵	حمایت شده
اصفهان	DD	تقاطع دانشگاه- از سمت خیابان دانشگاه	۱۰/۵	۲/٦	٤	متغیر	۱۲۰	حمایت شده
	TT	تقاطع توحید- از سمت خیابان توحید	۹	۳	۳	متغیر	۱۱۰	حمایت نشده
	AJ	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان جی	۱۰	۲/۵	٤	متغیر	۸۰	حمایت شده
	AKH	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان خواجه عمید	۷/۸	۲/٦	۳	متغیر	۸۰	حمایت شده
	MK	تقاطع ملک‌شهر- از سمت بلوار کاوه	۱۲	۳	٤	متغیر	۱۲۰	حمایت شده



تقاطع ایرانشهر– از سمت بلوار پاک‌نژاد و بلوار امام‌زاده جعفر



تقاطع امیرالمؤمنین– از سمت صدا و سیما



تقاطع دولت‌آباد– از سمت بلوار نواب و خیابان انقلاب



تقاطع پژوهش– از سمت میدان عالم و فلکهٔ اطلسی



تقاطع فرهنگیان– از سمت بلوارپاک‌نژاد



تقاطع مهدی– از سمت بلوار دههٔ فجر

شکل ۱ تصویر گوگل ارث از طرح هندسی تقاطعات بررسی‌شدهٔ شهر یزد



تقاطع دانشگاه– از سمت خیابان دانشگاه



تقاطع توحید– از سمت خیابان توحید

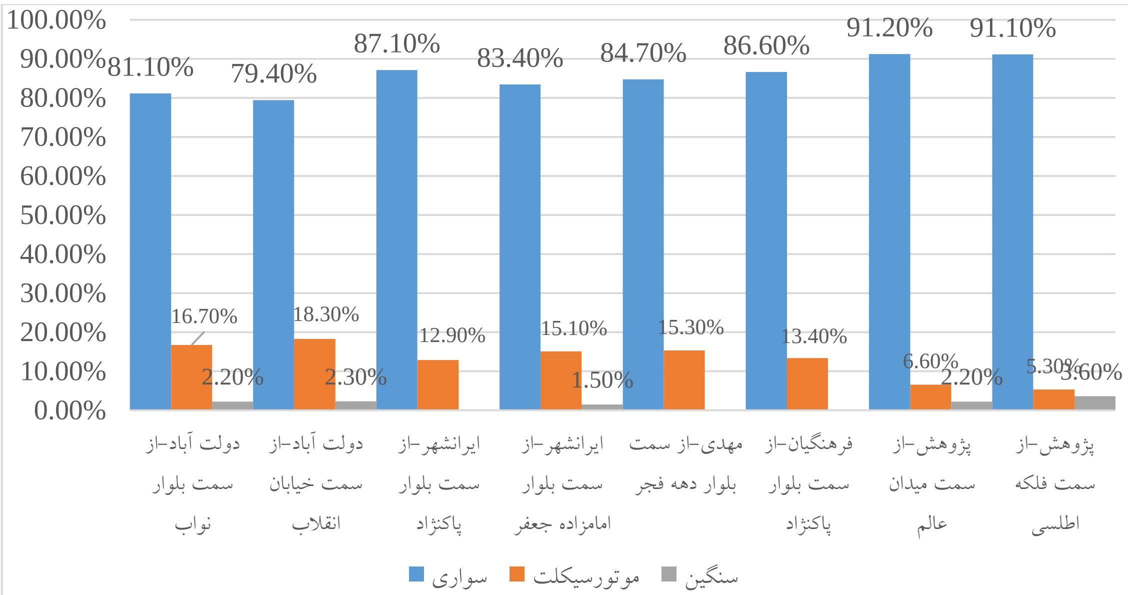


تقاطع ملک شهر– از سمت بلوار کاوه

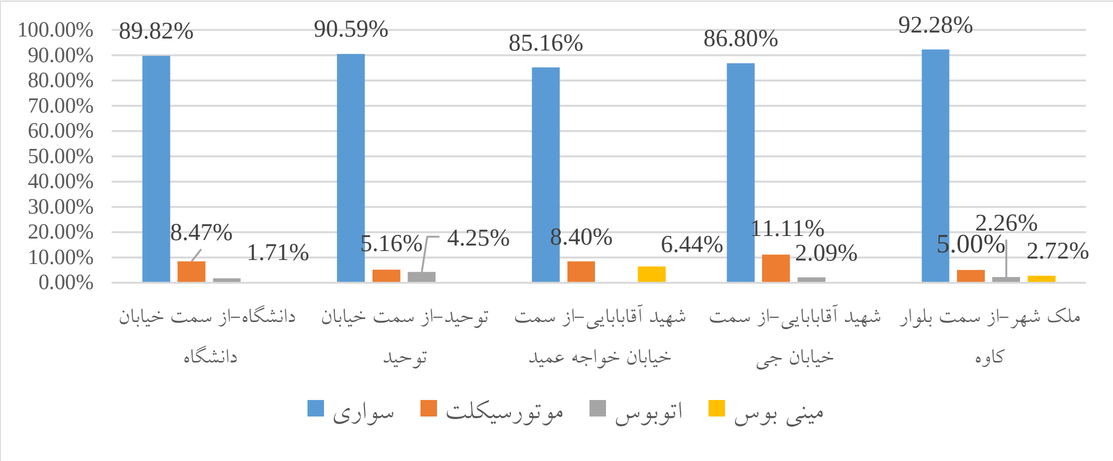


تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی– از سمت خیابان جی و خواجه عمید

شکل ۲ تصویر گوگل ارث از طرح هندسی تقاطعات بررسی‌شدهٔ شهر اصفهان



شکل ۳ ترکیب ترافیک تقاطعات بررسی‌شدهٔ شهر یزد



شکل ٤ ترکیب ترافیک تقاطعات بررسی‌شدهٔ شهر اصفهان

جدول ٣ مقادیر میانگین، تعداد سیکل و انحراف معیار داده‌های برداشت‌شده در تقاطعات شهر یزد

رویکرد	نوع وسیله نقلیه	وسیلهٔ نقلیهٔ سواری	موتورسیکلت	وسیلهٔ نقلیهٔ سنگین	زمان سبز اشباع
پژوهش-عالم	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	29.13	2	0.69	18.84
	تعداد سیکل برداشت	32	32	32	32
	انحراف معیار	8.404	1.344	0.693	4.487
پژوهش-اطلسی	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	35.41	2.00	1.44	24.44
	تعداد سیکل برداشت	32.00	32.00	32.00	32.00
	انحراف معیار	8.87	1.63	1.16	6.13
فرهنگیان-پاک‌نژاد	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	13.07	2.04	-	15.17
	تعداد سیکل برداشت	46.00	46.00	-	46.00
	انحراف معیار	2.93	1.49	-	2.70
دهٔ فجر-مهدی	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	21.74	4.44	-	28.53
	تعداد سیکل برداشت	34.00	34.00	-	34.00
	انحراف معیار	3.74	2.85	-	4.28
ایرانشهر-امامزاده	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	19.58	3.58	0.33	28.70
	تعداد سیکل برداشت	33.00	33.00	33.00	33.00
	انحراف معیار	3.33	1.60	0.60	3.40
ایرانشهر-پاک‌نژاد	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	22.70	3.39	-	25.30
	تعداد سیکل برداشت	33.00	33.00	-	33.00
	انحراف معیار	4.14	1.41	-	3.48
دولت‌آباد-انقلاب	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	12.15	2.91	0.33	15.06
	تعداد سیکل برداشت	33.00	33.00	33.00	33.00
	انحراف معیار	2.85	2.02	0.54	2.75
دولت‌آباد-نواب	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل	26.03	5.51	0.69	21.69
	تعداد سیکل برداشت	35.00	35.00	35.00	35.00
	انحراف معیار	3.34	2.03	0.63	1.66

جدول ٤ مقادیر میانگین، تعداد سیکل و انحراف معیار داده‌های برداشت‌شده در تقاطعات شهر اصفهان

رویکرد	نوع وسیلهٔ نقلیه	وسیلهٔ نقلیهٔ سواری	موتورسیکلت	اتوبوس	مینی‌بوس	زمان سبز اشباع
ملک‌شهر- کاوه	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل)	90.80	4.63	2.60	2.07	59.5
	تعداد سیکل برداشت	30.00	30.00	30.00	30.00	30
	انحراف معیار	9.33	1.59	1.10	1.20	5.04975
آقابابایی- جی	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل)	50.03	6.42	1.03	–	33.39
	تعداد سیکل برداشت	31.00	31.00	31.00	–	31.00
	انحراف معیار	4.67	2.13	0.66	–	2.92
آقابابایی- خواجه عمید	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل)	23.93	1.87	–	1.20	26.43
	تعداد سیکل برداشت	30.00	30.00	–	30.00	30.00
	انحراف معیار	5.02	1.11	–	0.92	3.02
توحید- توحید	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل)	45.52	1.36	1.84	–	37.56
	تعداد سیکل برداشت	25.00	25.00	25.00	–	25.00
	انحراف معیار	22.47	1.66	1.34	–	18.19
دانشگاه- دانشگاه	میانگین (تعداد یا ثانیه در هر سیکل)	45.94	4.55	0.81	–	56.94
	تعداد سیکل برداشت	31.00	31.00	31.00	–	31.00
	انحراف معیار	13.77	3.60	0.83	–	16.72

جدول ٥ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی DN

$(R^{٢}=٠/٧٣٤)$	B	Std. Error	Beta	T	Sig.
مقدار ثابت	7/354	1/682		4/372	0/000
سواری	0/486	0/053	0/979	9/112	0/000
موتورسیکلت	0/171	0/082	0/210	2/082	0/046
سنگین	1/062	0/262	0/404	4/048	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ٠/٤٨٦n_{١} + ٠/١٧١n_{٢} + ١/٠٦٢n_{٣} + ٧/٣٥٤$				

جدول ٦ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی DE

$(R^{٢}=٠/٨١٩)$	B	Std. Error	Beta	T	Sig.
مقدار ثابت	3/266	1/057		3/088	0/004
سواری	0/815	0/077	0/846	10/620	0/000
موتورسیکلت	0/459	0/108	0/338	4/243	0/000
سنگین	1/662	0/406	0/327	4/099	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ٠/٨١٥n_{١} + ٠/٤٥٩n_{٢} + ١/٦٦٢n_{٣} + ٣/٢٦٦$				

جدول ۷ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی EP

($R^{۲}$=۰/۸۷۹)	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	7/01	1/257		5/576	0/000
سواری	0/746	0/055	0/889	13/683	0/000
موتورسیکلت	0/399	0/160	0/162	2/498	0/018
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۷۴۶n_{۱} + ۰/۳۹۹n_{۲} + ۷/۰۱$				

جدول ۸ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی EE

($R^{۲}$=۰/۸۳۹)	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	9/250	1/629		5/677	0/000
سواری	0/874	0/077	0/853	11/370	0/000
موتورسیکلت	0/454	0/162	0/213	2/800	0/009
سنگین (اتوبوس غالب)	2/172	0/438	0/380	4/964	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۸۷۴n_{۱} + ۰/۴۵۴n_{۲} + ۲/۱۷۲n_{۳} + ۹/۲۵$				

جدول ۹ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی MD

($R^{۲}$=۰/۸۸۵)	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	6/332	1/533		4/130	0/000
سواری	0/925	0/072	0/809	12/843	0/000
موتورسیکلت	0/473	0/095	0/315	5/005	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۹۲۵n_{۱} + ۰/۴۷۳n_{۲} + ۶/۳۳۲$				

جدول ۱۰ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی FP

($R^{۲}$=۰/۷۲۸)	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	3/917	1/093		3/585	0/001
سواری	0/802	0/075	0/856	10/672	0/000
موتورسیکلت	0/363	0/144	0/203	2/527	0/015
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۸۰۲n_{۱} + ۰/۳۶۳n_{۲} + ۳/۹۱۷$				

جدول ۱۱ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی PA

($R^{۲}$=۰/۹۰۶)	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	3/632	1/047		3/470	0/002
سواری	0/482	0/033	0/902	14/762	0/000
موتورسیکلت	0/268	0/207	0/080	1/299	0/205
سنگین	0/943	0/421	0/146	2/240	0/033
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۴۸۲n_{۱} + ۰/۲۶۸n_{۲} + ۰/۹۴۳n_{۳} + ۳/۶۳۲$				

جدول ۱۲ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی PF

$(R^{۲}=۰/۹۰۸)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	1/959	1/464		1/338	0/192
سواری	0/569	0/044	0/824	12/859	0/000
موتورسیکلت	0/278	0/222	0/074	1/253	0/200
سنگین	1/226	0/336	0/232	3/648	0/001
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/٥٦۹n_{۱} + ۰/۲۷۸n_{۲} + ۱/۲۲٦n_{۳} + ۱/۹٥۹$				

جدول ۱۳ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی TT

$(R^{۲}=۰/۹۳٤)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	7/043	3/249		2/168	0/039
سواری	1/001	0/092	0/825	10/883	0/000
اتوبوس	2/477	1/196	0/124	2/071	0/048
موتورسیکلت	0/420	0/335	0/091	1/252	0/221
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۱/۰۰۱n_{۱} + ۰/٤۲n_{۲} + ۲/٤۷n_{٤} + ۷/۰٤۳$				

جدول ۱٤ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی DD

$(R^{۲}=۰/۹۹٦)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	1/061	0/523		2/030	0/055
سواری	0/728	0/014	0/899	50/224	0/000
اتوبوس	1/834	0/242	0/135	7/573	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/۷۲۸n_{۱} + ۱/۸۳٤n_{٤} + ۱/۰٦۱$				

جدول ۱٥ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی MK (موتورسیکلت+ اتوبوس+ مینی‌بوس)

$(R^{۲}=۰/۹۹٤)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	2/044	0/948		2/155	0/041
سواری	0/561	0/009	1/037	63/198	0/000
موتورسیکلت	0/229	0/049	0/072	4/648	0/000
اتوبوس	1/469	0/071	0/321	20/694	0/000
مینی بوس	0/776	0/069	0/185	11/323	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/٥٦۱n_{۱} + ۰/۲۲۹n_{۲} + ۱/٤٦۹n_{٤} + ۰/۷۷٦n_{٥} + ۲/۰٤٤$				

جدول ۱٦ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی MK (موتورسیکلت+ وسیلهٔ نقلیهٔ سنگین)

$(R^{۲}=۰/۹۸۲)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	1/706	1/611		1/059	0/300
سواری	0/550	0/015	1/052	38/042	0/000
موتورسیکلت	0/200	0/083	0/060	2/278	0/031
سنگین	1/100	0/085	0/362	13/119	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = ۰/٥٥n_{۱} + ۰/۲n_{۲} + ۱/۱n_{۳} + ۱/۷۰٦$				

جدول ۱۷ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی AKH

$(R^2=0/759)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	11/411	1/826		6/249	0/000
سواری	0/584	0/065	0/970	8/962	0/000
مینی‌بوس	0/875	0/354	0/267	2/472	0/020
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = 0/584n_1 + 0/875n_5 + 11/411$				

جدول ۱۸ نتایج آنالیز مدل رگرسیونی رویکرد ورودی AJ

$(R^2=0/95)$	B	Std. Error	Beta	t	Sig.
مقدار ثابت	1/096	1/449		0/756	0/456
سواری	0/587	0/027	0/940	21/713	0/000
موتورسیکلت	0/215	0/060	0/156	3/573	0/001
اتوبوس	1/504	0/195	0/339	7/711	0/000
رابطهٔ رگرسیون به‌دست‌آمده	$t = 0/587n_1 + 0/215n_2 + 1/504n_4 + 1/096$				

در روابط ذکر شده در جداول فوق، n_1، n_2، n_3، n_4 و n_5 به‌ترتیب تعداد وسایل نقلیهٔ عبوری سواری، موتورسیکلت، سنگین (کلی)، اتوبوس و مینی‌بوس در هر سیکل و t زمان سبز اشباع کل در هر سیکل (ثانیه) است. مقادیر B نیز در این جداول، همان ضرایب a_i ای هستند که در رابطهٔ (۱) تعریف شد.

همان‌گونه که از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، ضرایب رابطهٔ رگرسیونی به‌دست‌آمده برای وسایل نقلیهٔ سنگین در تمام تقاطعات مورد بررسی با سطح اطمینان ۹۵٪ به‌دست آمده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده در رابطه باموتورسیکلت‌ها نیز تقریبا با سطح اطمینان ۸۰٪ به‌دست آمده‌اند که این سطح اطمینان در محاسبات مربوط به تعیین نرخ جریان اشباع قابل‌قبول است. ضرایب هم‌بستگی مدل‌های برازش‌شده نیز حاکی از هم‌بستگی قوی بین وسایل نقلیهٔ عبوری و بازه‌های زمانی سبز مؤثر در سیکل‌های هر رویکرد موردبررسی می‌باشد.

در این پژوهش، اتوبوس و مینی‌بوس‌های عبوری در تقاطعات شهر یزد در یک گروه تحت عنوان «وسایل نقلیهٔ سنگین» قرار داده شده‌اند زیرا حجم عبوری هر کدام از این دو وسیلهٔ نقلیه کم و پراکنده بود و در عین حال حجم عبوری هر کدام بر حجم عبوری وسیلهٔ نقلیهٔ دیگر غالب نبود؛ درحالی‌که در شهر اصفهان، در برخی تقاطعات مورد بررسی، حرکت اتوبوس‌ها و در برخی دیگر حرکت مینی‌بوس‌ها غالب بودند؛ بنابراین برای برخی تقاطع‌های شهر اصفهان، امکان محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری به تفکیک برای اتوبوس و مینی‌بوس نیز وجود داشت. هم‌چنین، هرچند در برخی تقاطعات مورد بررسی، وسایل نقلیهٔ سنگین و موتورسیکلت درصد قابل ملاحظه‌ای را به خود اختصاص نداده بودند، اما در تمام سیکل‌های برداشت‌شده به‌طور کم‌وبیش یکنواخت حضور داشتند. بنابراین آنالیز رگرسیون در این موارد نیز منجر به برآورد مقادیر هم‌سنگ سواری معقولی شد.

در این پژوهش برای بررسی معناداری روابط رگرسیونی پیشنهادی، آزمون آمارهٔ F انجام شد که نتایج به‌دست‌آمده از آن در جدول (۱۹) ارائه شده‌است.

جدول ۱۹ نتایج آزمون معناداری روابط رگرسیون برازش‌شده

شهر	کد	نام رویکرد	F	Sig. (p-value)	R^2
یزد	DN	تقاطع دولت‌آباد- از سمت بلوار نواب	28/516	0/000	0/734
	DE	تقاطع دولت‌آباد- از سمت خیابان انقلاب	43/809	0/000	0/819
	IP	تقاطع ایرانشهر- از سمت بلوار پاک‌نژاد	109/434	0/000	0/879
	IE	تقاطع ایرانشهر- از سمت بلوار امامزاده جعفر	50/52	0/000	0/839
	MD	تقاطع مهدی- از سمت بلوار دهۀ فجر	119/562	0/000	0/885
	FP	تقاطع فرهنگیان- از سمت بلوارپاک‌نژاد	57/587	0/000	0/728
	PA	تقاطع پژوهش- از سمت میدان عالم	89/82	0/000	0/906
	PF	تقاطع پژوهش- از سمت فلکۀ اطلسی	92/526	0/000	0/9.8
اصفهان	DD	تقاطع دانشگاه- از سمت خیابان دانشگاه	40/223	0/000	0/996
	TT	تقاطع توحید- از سمت خیابان توحید	50/437	0/000	0/934
	AJ	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان جی	170/667	0/000	0/95
	AKH	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان خواجه عمید	42/507	0/000	0/982
	MK	تقاطع ملک‌شهر- از سمت بلوار کاوه	1060/253	0/000	0/996

تفسیر آزمون معناداری روابط رگرسیون برازش‌شده

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون معناداری آمارۀ F برای روابط رگرسیونی برازش‌شده حاکی از آن است که مقدار sig (p-value) کمتر از ۰,۰۵ است و فرض صفر آمارۀ F با اطمینان ۰,۹۵٪ درصد رد می‌شود؛ یعنی مدل موجود با اطمینان ۰,۹۵٪ درصد معنی‌دار است و براساس داده‌های موجود، این مدل قادر به بیان ضریب هم‌سنگ سواری می‌باشد.

بررسی اثر تعاملی متغیرهای روابط برازش‌شده

برای این بررسی از آزمون هم‌بستگی پیرسون استفاده شد. نتایج این آزمون در جدول (۲۰) و (۲۱) ارائه شده‌است. در آزمون هم‌بسستگی پیرسون، ضریب هم‌بستگی بین ۰ تا ۰،۲ نشان‌دهندۀ هم‌بستگی ناچیز، ضریب بین ۰،۲۰ تا ۰،٤ نشان‌دهندۀ هم‌بستگی ضعیف، ضریب بین ۰,٤تا ۰،٦ نشان‌دهندۀ هم‌بستگی متوسط و ضریب بین ۰،٦۰ تا ۱ نشان‌دهندۀ هم‌بستگی قوی و بسیار قوی مابین متغیرها می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون نشان می‌دهد که اکثر متغیرهای هر رویکرد هم‌بستگی ناچیز و یا ضعیفی باهم دارند. باتوجه به این نتایج و هم‌چنین با استناد به تحقیقات پیشین [27, 26, 24] ، در این تحقیق از اثر تعاملی بین متغیرها چشم‌پوشی شد و فرض شد که کلیۀ پارامترها به‌صورت مستقل از هم عمل می‌کنند.

در گام بعدی، ضرایب هم‌سنگ سواری براساس ضرایب رگرسیونی به‌دست آمده از تحلیل رگرسیونی و بااستفاده از رابطۀ (۲) محاسبه شدند. مقادیر هم‌سنگ سواری پیشنهادی، برای تقاطعات چراغ‌دار شهر یزد در جدول (۲۲)، برای تقاطعات چراغ‌دار شهر اصفهان در جدول (۲۳) و میانگین این مقادیر برای دو شهر اصفهان و یزد در جدول (٢٤) ارائه شده‌است. سپس برای بررسی رابطۀ معناداری بین ضرایب هم‌سنگ سواری پیشنهادی برای هر رویکرد، آزمون تی تک نمونه‌ای انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۲۵) ارائه شده است.

جدول ۲۰ نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون برروی داده‌های تقاطعات شهر یزد

شهر	کد	نام رویکرد	سواری و موتورسیکلت	سواری و سنگین	موتورسیکلت و سنگین
یزد	DN	تقاطع دولت‌آباد- از سمت بلوار نواب	-۰,۳۱	-۰,۳۱۲	۰,۱۵۲
	DE	تقاطع دولت‌آباد- از سمت خیابان انقلاب	-۰,۰۷۹	-۰,۰۹۵	-۰,۰۸٦
	IP	تقاطع ایرانشهر- از سمت بلوار پاک‌نژاد	۰,۲۱۹	–	–
	IE	تقاطع ایرانشهر- از سمت بلوار امامزاده جعفر	۰,۰۸۲	-۰,۱۱٦	-۰,۲۰۸
	MD	تقاطع مهدی- از سمت بلوار دهۀ فجر	۰,۲۵۸	–	–
	FP	تقاطع فرهنگیان- از سمت بلوارپاک‌نژاد	-۰,۰۸۲	–	–
	PA	تقاطع پژوهش- از سمت میدان عالم	-۰,۰٦۳	۰,۳	۰,۳
	PF	تقاطع پژوهش- از سمت فلکۀ اطلسی	۰,۱٤۸	۰,۳۲	-۰,۱۰۲

جدول ۲۱ نتایج آزمون هم‌بستگی پیرسون برروی داده‌های تقاطعات شهر اصفهان

شهر	کد	نام رویکرد	سواری و موتورسیکلت	سواری و اتوبوس	سواری و مینی‌بوس	موتورسیکلت و اتوبوس	موتورسیکلت و مینی‌بوس	اتوبوس و مینی‌بوس
اصفهان	DD	تقاطع دانشگاه- از سمت خیابان دانشگاه	-۰,٤۲٤	۰,۳٤۸	–	۰,۳۱	–	–
	TT	تقاطع توحید- از سمت خیابان توحید	-۰,٤۰۸	۰,٤۰۱	–	-۰,۳۲۸	–	–
	AJ	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان جی	-۰,۰۲۹	-۰,۰۹۸	–	-۰,۱۷۷	–	–
	AKH	تقاطع غیرهم‌سطح شهید آقابابایی- از سمت خیابان خواجه عمید	۰,۰۳۲۸	–	-۰,۳٤۷	–	-۰,۲۷٦	–
	MK	تقاطع ملک‌شهر- از سمت بلوار کاوه	-۰,۰۷۷	-۰,۱۲۹	-۰,۳۳٤	-۰,۰٦۷	-۰,۱۰٤	۰,۰۲۱

جدول ۲۲ نتایج ضرایب هم‌سنگ سواری تقاطع‌های شهر یزد

رویکرد	موتورسیکلت	سنگین (اتوبوس+ مینی بوس)
تقاطع PF	0/49	2/1
تقاطع PA	0/55	1/96
تقاطع MD	0/51	-
تقاطع EP	0/53	-
تقاطع EE	0/51	2/48
تقاطع DE	0/56	2/04
تقاطع DN	0/35	2/18
تقاطع FP	0/45	-
تقاطع AS	0/49	-
میانگین	۰/٤۹	۲/۱۵

جدول ۲۳ نتایج ضرایب هم‌سنگ سواری تقاطع‌های شهر اصفهان

رویکرد	موتورسیکلت	اتوبوس	مینی‌بوس	سنگین (اتوبوس+ مینی‌بوس)
تقاطع DD	۰/۴۲	۲/۴۷	–	–
تقاطع MK	۰/۴۱	۲/۶	۱/۳۹۰	–
	۰/۳۶	–	–	۲
تقاطع AJ	۰/۳۷	۲/۵۶	–	–
تقاطع TT	۰/۴۲	۲/۴۷	–	–
تقاطع SKH	–	–	۱/۵	–
میانگین	۰/۳۹۶	۲/۵۳	۱/۴۵	۲

جدول ۲۴ میانگین ضرایب هم‌سنگ سواری به‌دست‌آمده از دو شهر اصفهان و یزد

وسیلهٔ نقلیه	ضریب هم‌سنگ
موتورسیکلت	۰/۴۶
مینی‌بوس	۱/۴۵
اتوبوس	۲/۵۳
سنگین (اتوبوس و مینی‌بوس)	۲/۱۳

جدول ۲۵ نتایج آزمون تی تک نمونه‌ای برای ضرایب هم‌سنگ

وسیلهٔ نقلیه	ضریب هم‌سنگ مفروض	t	df	Sig.
موتورسیکلت	0/46	-0/075	13	0/941
اتوبوس	2/53	-0/152	3	0/888
مینی‌بوس	1/45	-0/091	1	0/942
وسیلهٔ نقلیهٔ سنگین	2/13	-0/043	5	0/967

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب هم‌سنگ سواری به‌دست‌آمده برای موتورسیکلت‌ها در دو شهر اصفهان و یزد در بازهٔ ۰/۳۵ الی ۰/۵۶ و برای وسایل نقلیهٔ سنگین در بازهٔ ۱/۹۶ الی ۲/۴۸ متغیر بوده‌است. برای تقاطعات شهر اصفهان، ضریب هم‌سنگ سواری برای مینی‌بوس به‌طور متوسط ۱/۴۵، برای اتوبوس در بازهٔ ۲/۴۷ الی ۲/۶ به‌دست آمد، در حالی‌که این نتایج برای وسایل نقلیهٔ سنگین (اتوبوس + مینی‌بوس) برای تقاطعات شهر یزد در بازهٔ ۱/۹۶ الی ۲/۴۸ حاصل شد. به‌طور کلی ضریب هم‌سنگ سواری برای وسایل نقلیهٔ سنگین دو شهر اصفهان و یزد ۲/۱۳ به‌دست آمد. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده برای دو شهر اصفهان و یزد نشان می‌دهد که ضرایب هم‌سنگ سواری برای این دو شهر به‌هم نزدیک هستند و بنابراین شاید بتوان پیش‌بینی نمود که این مقادیر برای شهرهای دیگر ایران نیز کم‌وبیش مشابه باشد.

تفسیر نتایج آزمون تی تک نمونه‌ای

باتوجه به جدول (۲۵) سطح معناداری آزمون (sig.) برای ضرایب هم‌سنگ تمام وسایل نقلیه بیشتر از سطح خطای ۰,۰۵ می باشد که نشان می‌دهد فرضیهٔ صفر را در سطح ۵ درصد نمی‌توان رد کرد و می‌توان نتیجه گرفت که

میانگین هر یک از ضرایب هم‌سنگ محاسبه‌شده برای وسایل نقلیهٔ موجود برابر با مقادیر ارائه‌شده در جدول (۲۵) می‌باشد.

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای ضرایب هم‌سنگ سواری با مقادیر پیشنهادی در آیین‌نامه‌های کشورهای استرالیا، مالزی، اندونزی، آمریکا و روش وبستر برای کشور انگلستان در جدول (۲۱) ارائه شده‌است.

جدول ۲۶ ضرایب هم‌سنگ سواری انواع وسایل نقلیهٔ مورد استفاده در سایر کشورها [32,31,30,29,28]

وسیلهٔ نقلیه	سنگین (کامیون+ اتوبوس)	موتورسیکلت
وبستر	۱/۹۵	۰/۳۲
آمریکا	۲	–
اندونزی	۱/۳	۰/٤
مالزی	۱/٦	۰/۲۲
استرالیا	۲–۲/۵	*
ایران (این تحقیق)	۲/۱۳	۰/٤٦
* ضریب هم‌سنگ مربوط به‌صورت میدانی محاسبه می‌شود.		

مقایسهٔ ضرایب هم‌سنگ سواری به‌دست‌آمده از آنالیز رگرسیون چندمتغیره با ضرایب پیشنهادی توسط آیین‌نامه‌های منتخب نشان می‌دهد که ضرایب به‌دست‌آمده از روش رگرسیون برای تقاطع‌های مورد بررسی در این پژوهش عموما بیشتر از ضرایب پیشنهادی کشورهای نام‌برده است. عواملی هم‌چون تفاوت ابعاد وسایل نقلیه، تفاوت قدرت موتور، مانورپذیری و شتاب‌گیری وسایل نقلیه، استاندارد به‌کار رفته در طراحی هندسی تقاطع‌ها، رفتار رانندگی متفاوت، تفاوت‌های موجود در زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی تقاطع‌ها و شرایط متفاوت محیط پیرامونی‌تقاطع‌ها در آن کشورها را در مقایسه با کشور ایران از جمله دلایل این اختلاف می‌توان برشمرد.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به بررسی و تخمین مقادیر ضریب هم‌سنگ سواری به‌روش آنالیز رگرسیون چندمتغیره در تقاطعات چراغ‌دار شهرهای اصفهان و یزد پرداخته شد. هدف اصلی این تحقیق، تخمین مقادیر مناسب‌تر این ضرایب برای شرایط حاکم بر تقاطع‌های کشور ایران به‌جای استفاده از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌های کشورهای دیگر به‌منظور استفاده در طراحی، زمان‌بندی و تحلیل ظرفیت و عملکرد تقاطعات چراغ‌دارکشور ایران بود.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش را به‌شرح ذیل می‌توان خلاصه نمود:

۱. نتایج این مطالعه نشان داد که روش آنالیز رگرسیون، روش مناسبی برای محاسبهٔ ضریب هم‌سنگ سواری در شرایط ترافیکی ناهم‌گن و نامنظم مانند شرایط ترافیکی حاکم بر ایران می‌باشد. در این پژوهش، روابط رگرسیون برای ۱۳ رویکرد از تقاطعات چراغ‌دار شهرهای اصفهان و یزد برازش شدند و سپس بااستفاده از این روابط، ضرایب هم‌سنگ سواری محاسبه شدند. بدین ترتیب، مقادیر ضرایب هم‌سنگ سواری ۲/۵۳، ۱/٤۵ و ۰/٤٦ به‌ترتیب برای اتوبوس، مینی‌بوس و موتورسیکلت به‌دست آمد.

۲. هنگامی‌که تردد اتوبوس‌ها و مینی‌بوس‌ها در تقاطعات اندک باشند، می‌توان از مجموع آنها تحت عنوان «وسایل نقلیهٔ سنگین» با ضریب هم‌سنگ سواری برابر با ۲/۱۳ در تحلیل و طراحی‌ها استفاده کرد.

۳. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل رگرسیون با نتایج سایر کشورها نشان داد که ضرایب هم‌سنگ به‌دست‌آمده از روش آنالیز رگرسیون در تقاطعات مورد بررسی قدری بیشتر از مقادیر پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌های کشورهای دیگر است. این اختلاف احتمالا ناشی از تفاوت‌های موجود در مشخصات وسایل نقلیه، رفتار رانندگی، جزئیات سیستم کنترل ترافیک و شرایط محیط پیرامونی تقاطع‌ها باشد.

مراجع

1. Krammes, R., and Crowley, K.,"Passenger car equivalents for trucks on level freewaysegments", 65th *Annual Meeting of the Transportation Research Board, Transportation Research Record 1091,* National Research Council,Washington, D.C, No. 1091, pp. 10-17, (1986).
2. Dehghani-Zadeh, M., and Fallah Tafti, M.,"Estimating saturation flow under weak discipline traffic condition, case study: Iran", *Journal of Archives of Transport,* Vol. 46(2), pp. 47-60. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.2102, (2018).
3. Greenshields, B. D., Shapiro, D., and Ericksen, E. L., "Traffic performance at urban intersections", Technical Report No. 1, Bureau of Highway Traffic, Yale University, (1947).
4. Kimber, R.M., McDonald, M., and Hounsell, N., "Passenger car units in saturation flows: concept, definition, derivation", *Journal of Transportation Research Part B: Methodological, Department of Civil Engineering, The University of Southampton, England*, Vol. 19, No.1, pp. 39-61, (1985).

۵. سازمان برنامه و بودجه، «تقاطع‌های هم‌سطح شهری: سوابق مطالعات»، نشریهٔ معاونت امور فنی و تدوین معیارها، سازمان برنامه و بودجه، شمارهٔ ۱۴۵ – ۳، (۱۳۷٦).

6. Teply, S., and Jones, A. M., "Saturation flow: Do we speak the same language?", *Transportation Research Record*, No. 1320, pp. 144-153, (1991).
7. Werner, A., and Morrall, J., "Passenger car equivalencies of trucks, buses, and recreational vehicles for two-lane rural highways", *Transportation Research Record 615, Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, DC, No. 615, pp. 10-17, (1976).

۸. ها شمیان، فرزاد، و ر ضایی، محمدامین، «برر سی روش‌های تعیین ضریب هم سنگ سواری و سایل نقلیه»، کنفرانس مهند سی عمران، معماری و مدیریت پایدار شهری، (۱۳۹۳).

۹. امینی، بهنام، و شهراد، شروین، «ارزیابی مقیاس‌های ضرایب هم سنگ سواری و سایل نقلیهٔ سنگین در راه‌های دو خطهٔ دو طرفهٔ ایران براساس روش‌های اختلاف سرعت و سرفاصلهٔ وسایل نقلیه»، پژوهش‌نامهٔ حمل‌ونقل، سال نهم، شمارهٔ چهارم، (۱۳۹۱).

10. Chandra, S., and Kumar, U., "Effect of lane width on capacity under mixed traffic conditions in India", *Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 129, No. 2, pp. 155-160, (2003).
11. Hu, Y., and Johnson, R., "Passenger car equivalents of trucks in composite traffic", Report DTFH, FHWA, U.S. Department of Transportation, (1981).
12. St John, A., and Glauz, W., "Speeds and service on multilane upgrades", *55th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Transportation Research Record 615, National Research Council*, Washington, DC, No.615, pp. 4-9, (1976).

۱۳. خاکی، علی، و نا صری فرد، حمید، «محا سبهٔ ضریب هم سنگ سواری موتور سیکلت در تقاطع‌های چراغ‌دار برا ساس تحلیل تأخیر»، دهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل ترافیک، (۱۳۸۹).

۱۴. نصیری، حبیب الله، طباطبایی، سارا، و جعفریان، احسان، «برآورد هم‌سنگ سواری وسایل نقلیهٔ سنگین در تقاطع‌های چراغ‌دار براساس پارامتر تأخیر»، اولین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت، (۱۳۸۲).

15. Cunagin, W., and Messer, C., "Passenger car equivalents for rural highways", ~~In~~ *62nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Transportation Research Record 905. TRB*, National Research Council, Washington, DC, No. 905, pp. 61-68, (1983).

16. Demarchi, S., and Setti, J., "Limitations of pce derivation for traffic streams with more than one truck type", *Transportation Research Board*~~TRB~~ *2003 Annual Meeting CD-ROM*, No. 1852, (2003).

۱۷. اویسی، خسرو، سهرابی، سهیل، و اسرافیلی، حنا، «تعیین ضریب هم‌سنگ سواری وسایل نقلیهٔ سنگین بااستفاده از نمودارهای چگالی- نرخ جریان در آزادراه‌های کشور (مطالعهٔ موردی: آزادراه تهران- کرج)»، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی حمل‌ونقل ترافیک، (۱۳۹٤).

18. Minh, C. C., and Sano, K., "Analysis of motorcycle effects to saturation flow rate at signalized intersection in developing countries", *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp. 1211-1222, (2003).

19. Kumar, P., Arkatkar, Sh., And Joshi, G., "New approach for estimating passenger car units on multilane urban roads with heterogeneous traffic conditions", *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol. 144, No. 3, pp. 1-14, (2018).

20. Pajecki, R., Ahmed, F., Qu, X., Zheng, X., Yang, Y,. and Easa, S., "Estimating passenger car equivalent of heavy vehicles at roundabout entry using micro-traffic simulation", *Frontiers in Built Environment*, Vol.5, No.77, pp. 1-11 (2019).

21. Pal, D., Sen, S., Chakraborty,S., and Roy, K., S., "Effect of pcu estimation methods on capacity of two-lane rural roads in india: a case study", *Transportion Research Procedia*, Vol. 48, pp. 734-746, (2019).

22. Mondal, S., Arya, V. K., D., and Gunarta, S., "Comparative analysis of saturation flow using various pcu estimation methods", *Transportion Research Procedia*, Vol. 48, pp. 3153-3162, (2020).

23. Granà, A., Giuffrè, T., Macioszek, E., and Acuto, F. "Estimation of passenger car equivalents for two-lane and turbo roundabouts using aimsun", *Frontiers in Built Environment*, Vol. 6, No. 86, pp.1-16, (2020).

24. Sugiarto, S., Apriandy, F., Darma,Y., Saleh,S. M., Rusdi, M., and Miwa, T., "Determining passenger car equivalent (pces) for pretimed signalized intersections with severe motorcycle composition using bayesian linear regression", *Plos One*, Vol. 16, No. 9, (2021).

25. Indian Road Congress, "Guidelines for the design of at-grade intersection in rural & urban area ", ~~IRC~~*Indian Road Congress-Special Publication, No.41*, (1994).

26. Adnan, M., "Passenger car equivalent factors in heterogenous traffic environment-are we using the right numbers?", *Procedia Engineering, Fourth International Symposium on Infrastructure Engineering in Developing Countries*, Vol. 77, pp.106 – 113, (2013).

27. Adams, Ch. A., Zambang, M. A. M., and Boahen, R. O., "Effects of motorcycles on saturation flow rates of mixed traffic at signalized intersections in Ghana", *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 94-101, (2015).
28. Werner, A., and Webster, F. V., "Traffic signal settings", Road Research Laboratory Technical Paper~~No. 39~~, HMSO, London, No. 39, (1958).
29. Transportation Research Board., "Highway capacity manual", Transportation Research Board-National Research Council, Washangton D.C, (2010).
30. Indonesian Directorate General of Highways., "Indonesian highway capacity manual, urban and semi-urban traffic facilities", Ministry of Public Work, (1993).
31. Malaysian Ministry of Works., "Malaysian highway capacity manual 2006", Chapter 3, (2006).
32. Austroads, "Guide to traffic management", Part 3: Transport Studies and Analysis Methods, Austroads Ltd, (2009).